

УДК 681.5.03:681.5.015

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИВОДА РОТОРНОГО СТОЛА БУРОВОЇ УСТАНОВКИ

О.В. Фадєєва

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 46067;  
e-mail: [kafatp@ukr.net](mailto:kafatp@ukr.net)

*Розглядається нове вирішення проблеми моделювання асинхронних двигунів приводу роторного стола бурових установок. Результати можуть знайти застосування в системах автоматичного контролю. Намічені перспективи подальших досліджень в даному напрямі.*

*Рассматривается новое решение проблемы моделирования асинхронных двигателей привода роторно-го стола буровых установок. Результаты могут найти применение в системах автоматического контроля. Намечены перспективы дальнейших исследований в данном направлении.*

*A new decision of problem of asynchronous engines design of rotor table drive of the borings settings is rotined in the article. Results can be applied in the automatic checking systems. The prospects of further researches in this direction are set.*

Удосконалення механічних характеристик асинхронних двигунів приводу роторного стола бурових установок є актуальним науково-практичним завданням у зв'язку з необхідністю створення сучасних засобів автоматичного контролю енергетичних показників процесу буріння нафтових і газових свердловин.

Проте аналіз літературних джерел (наприклад, [1÷3] та ін.) свідчить про недостатній обсяг проведених досліджень в контексті використання механічних характеристик двигунів приводу роторного стола для вирішення завдань автоматичного контролю. Дійсно, будувати механічні характеристики асинхронних двигунів  $M = f_1(s)$ ,  $\omega = f_2(M)$ , де  $M$  – момент електродвигуна,  $\omega$  – кутова частота обертання

електродвигуна,  $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  – ковзання,  $\omega_0$  –

синхронна частота обертання за загальновідомими формулами, що пропонуються в курсі «Електричні машини», важко, оскільки, необхідні дані, яких немає навіть у каталогах [1]. Тому користуються спрощеними моделями механічних характеристик асинхронних двигунів, які створені на базі спрощеної схеми заміщення асинхронного двигуна [3]:

$$M = \frac{2M_K(1+as)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2as_K}, \quad (1)$$

де:  $M_K$  – максимальний момент двигуна;  
 $s_K$  – критичне ковзання, що відповідає максимальному моменту;

$a = r_c/r_p$  – коефіцієнт, який враховує відношення опору обмотки статора  $r_c$  до приведенного опору ротора  $r_p$  або

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}. \quad (2)$$

Рівняння (2) отримано німецьким вченим Клосом для двигунів великої потужності, коли можна знехтувати активним опором обмотки статора, тобто  $r_c = 0$ . Рівняння (2) дає змогу за паспортними даними двигуна побудувати його природні механічні характеристики  $M = f_1(s)$ ,  $\omega = f_2(M)$ .

Для цього слід додатково визначити такі величини за паспортними даними двигуна:

номінальний момент

$$M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}}, \text{ Нм};$$

критичний момент  $M_K = \lambda M_{ном}$ , Нм;

номінальне ковзання

$$s_{ном} = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n};$$

критичне ковзання

$$s_K = s_{ном}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}),$$

де:  $P_{ном}$  – номінальна потужність, кВт;

$n_{ном}$  – номінальна швидкість обертання, об/хв;

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}};$$

$M_{max}$  – максимальний момент двигуна;

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}, \text{ рад/с}; \quad n_0 = \frac{60f}{p}, \text{ об/хв};$$

$$f = 50 \text{ Гц}; \quad \omega_{ном} = \frac{\pi n_{ном}}{30}, \text{ рад/с}.$$

Задаються значеннями  $s = 0 \div 1$ , визначають момент за рівнянням (2) і будують механічну характеристику  $M = f(s)$ . Наявність у формулі (2) параметрів, що базуються на паспортних даних двигуна, вносять певну нечіткість у результати розрахунків і суттєву похибку у визначенні моменту конкретного двигуна. Розра-

Таблиця 1 – Порівняння різних формул апроксимації залежності  $M = f(s)$

Рівняння механічної характеристики $M = f(s)$	Середнє значення моменту в межах зміни ковзання від 0 до $s_{\max}$ $M_{\text{сеп}} = \frac{1}{s_{\max}} \int_0^{s_{\max}} M ds$	Середнє значення для двигуна привода
$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$	$M_{\text{сеп}} = M_K \frac{s_K}{s_{\max}} \ln \left[ \left( \frac{s_{\max}}{s_K} \right)^2 + 1 \right]$	1,530
$M = 2 \frac{M_K}{s_K} s$	$M_{\text{сеп}} = M_K \frac{s_{\max}}{s_K}$	1,950
$M = \frac{M_K}{s_K} s$	$M_{\text{сеп}} = \frac{1}{2} M_K \frac{s_{\max}}{s_K}$	0,975
$M = \frac{M_H}{s_H} s$	$M_{\text{сеп}} = \frac{1}{2} M_H \frac{s_{\max}}{s_H}$	1,875
$M = \frac{M_H}{2s_H - s_H^2} (2s - s^2)$	$M_{\text{сеп}} = \frac{1}{3} M_H \frac{3s_{\max} - s_{\max}^2}{2s_H - s_H^2}$	1,820
$M = \frac{4}{3} \frac{M_K}{s_K} s$	$M_{\text{сеп}} = \frac{2}{3} M_H \frac{s_{\max}}{s_K}$	1,310
$M = \frac{3}{2} \frac{M_K}{s_K} s$	$M_{\text{сеп}} = \frac{3}{4} M_K \frac{s_{\max}}{s_K}$	1,470

хунки ускладнюються ще й внаслідок нелінійної залежності моменту  $M$  від ковзання  $s$ , тому роблять лінеаризацію механічної характеристики [2]. Як критерій оцінки точності лінеаризації різними апроксимуючими функціями використовують [2] середнє значення моменту  $M_{\text{сеп}}$  в інтервалі зміни ковзання від нуля до  $s_{\max}$ , яке відповідає максимальному моменту двигуна

$$M_{\text{сеп}} = \frac{1}{s_{\max}} \int_0^{s_{\max}} M ds. \quad (3)$$

Порівняння різних формул апроксимації залежності  $M = f(s)$  для двигунів з  $s_H = 5,5\%$ ;  $s_{\max} = 15\%$ ;  $M_K = 2,3$  кНм подано у табл. 1 [2].

З табл.1 бачимо, що середнє значення моменту для досліджуваного двигуна коливається від 0,975 до 1,95 кНм. Така велика похибка апроксимації є неприпустимою для on-line моніторингу моменту асинхронного двигуна.

Тому метою даною роботи є розроблення такої інформаційної математичної моделі моменту двигуна привода роторного стола бурової установки, яка була б придатною для вирішення задач автоматичного контролю моменту на валі двигуна в реальному часі.

Для вирішення цієї задачі використали методи порівняння, математичного і комп'ютерного моделювання, теорії автоматизованого електропривода. Порівняння різних формул апроксимації залежності  $M = f(s)$  проведено для привода роторного стола Р-560 з електродвигуном АКБ-114-6 бурової установки «Урал-маш-4Э-76».

Механічна характеристика була побудована за такими паспортними даними [3] двигуна АКБ-114-6:  $P_{\text{ном}} = 320$  кВт;  $U_{\text{ном}} = 500$  В;

$n_{\text{ном}} = 980$  об/хв;  $I_{\text{ном}} = 455$  А;  $\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = 2,5$ ;

$p = 3$ ;  $\cos \varphi = 0,88$ ; ККД = 92,5%. Для визначення першої точки механічної характеристики знаходимо  $M=0$ ;  $S=0$ ;  $n=n_0$ ;  $\omega=\omega_0$ ;

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 + 1000}{30} = 104,6 \text{ рад/с};$$

$$n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.}$$

Друга точка механічної характеристики:  
 $M = M_{\text{ном}}$ ,  $s = s_{\text{ном}}$ ,  $\omega = \omega_{\text{ном}}$ ;

$$M_{\text{ном}} = 9550 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 3118,36 \text{ , Нм};$$

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n} = 0,02;$$

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30} = 102,57,$$

$$s_{\text{ном}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ном}}}{\omega_0} = 0,02.$$

Третя точка механічної характеристики:

$$M = M_K, s = s_K, \omega = \omega_K;$$

$$M_K = \lambda M_{\text{ном}} = 7795,9 \text{ Нм};$$

$$s_K = s_{\text{ном}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,0958;$$

$$\omega_K = \omega_0 (1 - s_K) = 94,57 \text{ рад/с.}$$

Таблиця 2 – Вихідні дані для побудови механічної характеристики двигуна привода роторного стола бурової установки

$s$	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$M$ , Нм	6076,3	3531,95	2437,89	1840,89	1369,14
$\omega$ , рад/с	83,68	62,76	41,84	20,93	0

Нелінійну частину механічної характеристики розраховано згідно спрощеного рівняння механічної характеристики (рівняння Клоса (2)).

Тепер задаємося значеннями ковзання від  $s_k$  до 1 і визначимо  $M$  і  $\omega$ .

На рис.1 по побудовано механічну характеристику  $M = f(s)$  для двигуна АКБ-114-6

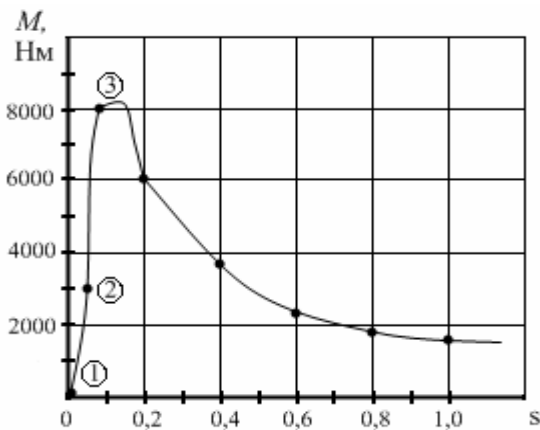


Рисунок 1 – Механічна характеристика  $M = f(s)$  для двигуна АКБ-114-6

Враховуючи, що робочою є ділянка механічної характеристики, яка відповідає зміні ковзання в діапазоні  $0 \div 0,1$ , скористаємося методами комп'ютерного моделювання і програмним пакетом Curve Expert для інтерполяції заданої функції.

Похибка інтерполяції оцінюється стандартною абсолютною середньоквадратичною похибкою

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta_i^2}{k}}, \quad (4)$$

та відносною похибкою

$$d = \frac{\sigma}{M_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де:  $\Delta_i = M(s_i) - \varphi(s_i)$

$M(s_i)$  – функція, яка задана у вигляді таблиці;

$\varphi(s_i)$  – функція інтерполяції;

$k$  – кількість вузлів вихідної функції, що задана таблично;

$M_{\text{ном}}$  – номінальне значення функції.

Для порівняння вибрано три інформаційні моделі: 7th Degree Polinomial Fit, Sinusoidal Fit та Quadratic Fit. В програмі позначення  $M$  замінено на  $y$ , а  $s$  – на  $x$ . Результати аналізу математичних моделей залежності моменту двигуна від ковзання на базі критеріїв (4) і (5) наведено в табл.3.

Аналіз результатів, наведених в табл. 3, засвідчив, що для опису механічної характеристики двигуна найбільше підходить інформаційна модель 7th Degree Polinomial Fit, для якої відносна похибка інтерполяції коливається в межах  $d = 0,95 - 1,198\%$ . Проте ця інформаційна модель є поліномом сьомого порядку, і для практичних розрахунків її використати важко. Більш раціональним є використання інформаційної моделі Sinusoidal Fit, яка в номінальному режимі роботи двигуна забезпечує відносну похибку інтерполяції в межах  $3,065 \div 4,876\%$ .

Отже, для практичного використання можна рекомендувати інформаційну модель

$$y = a + b \cos(cx + d), \quad (6)$$

яка для механічної характеристики двигуна АКБ-114-6 має такий вигляд:

$$y = 2024 + 6324,7 \cos(14,45x - 1,89) \quad (7)$$

або

$$M = 2024 + 6324,7 \cos(14,45s - 1,89). \quad (8)$$

Вікно програмного середовища Curve Expert для цієї інформаційної моделі наведено на рис. 2.

Бачимо, що теоретична крива, побудована за рівнянням (7), добре узгоджується з заданою системою 13 точок  $(y_i, x_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, 13$ ), а коефіцієнт кореляції дорівнює  $r = 0,99969$ . Модель (6) справедлива для будь-якого електричного асинхронного двигуна і може бути складовою математичної моделі процесу буріння нафтових і газових свердловин замість математичної моделі Клоса та інформаційною моделлю для систем автоматизованого контролю моменту на валі асинхронних двигунів.

Тепер розглянемо залежності похибок інтерполяції від кількості точок  $n$  для моделей Polinomial Fit та Sinusoidal Fit. Для цього будемо зменшувати кількість точок, починаючи з 13 до 9. Результати досліджень наведено в табл.4.

Бачимо, що найкращий результат дає інтерполяція механічної характеристики двигуна інформаційною моделлю Sinusoidal fit з кількістю вузлів 9. Кількість вузлів зменшена за рахунок точок 2,3,4,5, які належать практично лінійній частині механічної характеристики  $M = f(s)$ . Вікно програмного середовища Curve Expert для цієї інформаційної моделі наведено на рис.3.

Таблиця 3 – Результати аналізу математичних моделей залежності моменту двигуна від ковзання на базі критеріїв (4) і (5)

Інформаційна модель	Кількість вузлів вихідної функції, що задана таблично	Коефіцієнти інформаційних моделей	Абсолютна середньо-квадратична похибка інтерполяції	Відносна похибка інтерполяції, %
7th Degree Polinomial Fit $y = a+bx+cx^2+dx^3+\dots$	13	$a = -2,183$ $b = 107961,71$ $c = -396267,13$ $d = -8092819,4$ $e = 2,7142851e+008$ $f = -2,5443941e+009$ $g = 7,3940511e+009$	30,566	0,98
	14	$a = -0,7661529$ $b = 96259,81$ $c = 1250282$ $d = -82361999$ $e = 1,8395474e+009$ $f = -1,9423172e+010$ $g = 9,7123951e+010$ $h = -1,8686099e+011$	34,034	1,091
	15	$a = -2,544042$ $b = 100713,15$ $c = 575269,15$ $d = -53095348$ $e = 1,2467088e+009$ $f = -1,3318951e+010$ $g = 6,616672e+010$ $h = -1,2550829e+011$	37,372	1,198
Sinusoidal Fit $y = a+b\cos(cx+d)$	13	$a = 2023.988$ $b = 6324.6934$ $c = 14.45609$ $d = -1.8905908$	95,6	3,065
	14	$a = 2495.073$ $b = 5796.8005$ $c = 15.740867$ $d = -2.0048153$	110,525	3,54
	15	$a = 3034,2568$ $b = 5232,2711$ $c = 17,48308$ $d = -2,1645683$	152,069	4,876
Quadratic Fit $y = a+bx+cx^2$	13	$a = -68,280664$ $b = 112382,1$ $c = -3633535,06$	187,514	6,013
	14	$a = -131,81988$ $b = 117736,33$ $c = -412341,38$	250,098	8,02
	15	$a = -259,10923$ $b = 125571,09$ $c = -475721,75$	343,161	11,00

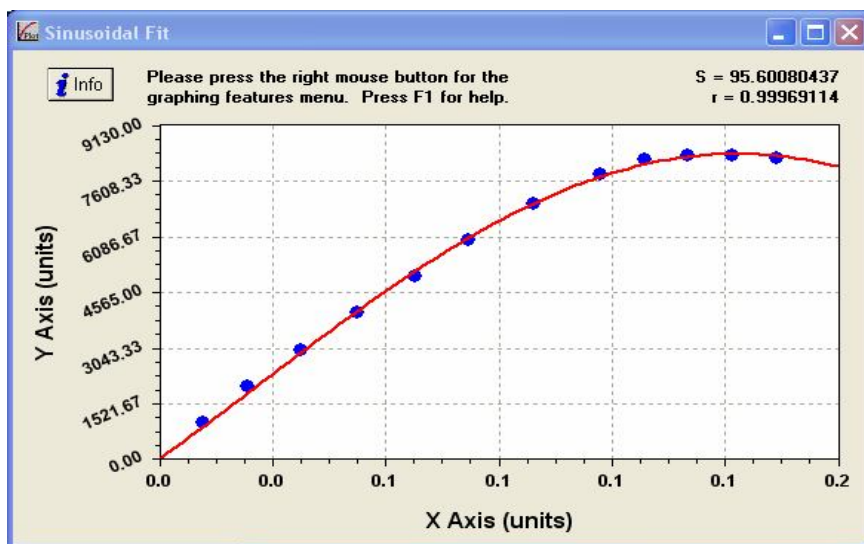


Рисунок 2 – Вікно програмного середовища Curve Expert для інформаційної моделі (7)

Таблиця 4 – Результати аналізу похибок інтерполяції механічної характеристики двигуна залежно від кількості вузлів вихідної функції

Інформаційна модель	Кількість вузлів вихідної функції, що задана таблично	Абсолютна середньоквадратична похибка інтерполяції	Відносна похибка інтерполяції, %
7th Degree Polinomial Fit $y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots$	13	71,96	2,3076
	12 (без точки №4)	76,21	2,443
	12 (без точки №3)	68,64	2,201
	11 (без точок №3,4)	66,44	2,133
	10 (без точок №2,3,4)	52,95	1,698
	9 (без точок №2,3,4,5)	51,49	1,651
Sinusoidal Fit $y = a + b \cos(cx + d)$	13	104,19	3,341
	12 (без точки №4)	105,25	3,375
	12 (без точки №3)	90,73	2,508
	11 (без точок №3,4)	76,59	2,462
	10 (без точок №2,3,4)	55,74	1,767
	9 (без точок №2,3,4,5)	40,90	1,311

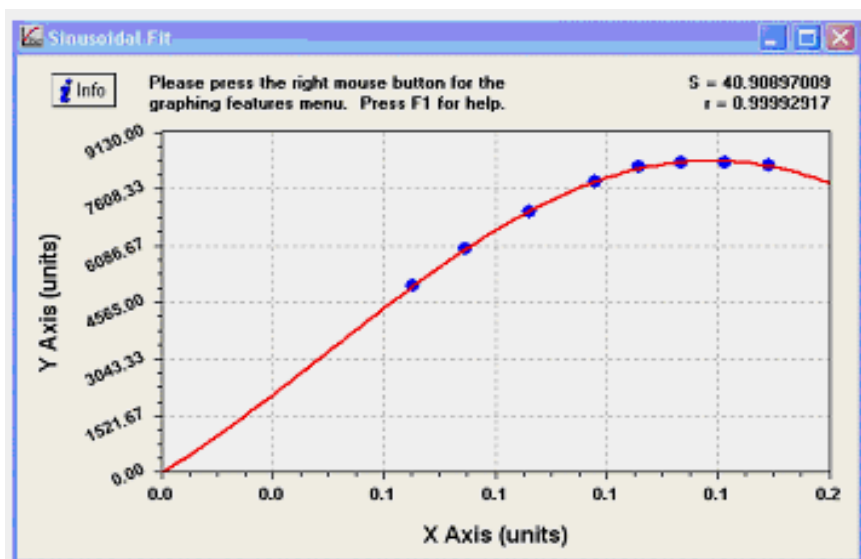


Рисунок 3 – Вікно програмного середовища Curve Expert для інформаційної моделі Sinusoidal Fit з кількістю вузлів 9

## Висновок

Удосконалено нелінійну математичну модель механічної характеристики асинхронного двигуна привода роторного стола бурової установки, яка, на відміну від моделі Клоса, що містить такі неконтрольовані параметри як критичний момент і критичне ковзання, побудована на базі інформаційної моделі Sinusoidal Fit, і адекватно описує зв'язок між поточним значенням ковзання і моментом двигуна, що дає змогу використати її в системах on-line моніторингу.

## Література

- 1 Ключев В.И. Теория электропривода / В.И.Ключев. – М.: Энергоатомиздат. – 1985. – 560 с.
- 2 Атакишиев Т.А. Электроэнергетика нефтяных и газовых скважин / В.И.Ключев, Т.А.Атакишиев, Р.В.Бабаев, А.А.Барыудин. – М.: Недра. – 1988. – 221 с.
- 4 Ожоган В.А. Электрификация нефтяной и газовой промышленности / В.А.Ожоган, А.С.Чернов, А.А.Семенцова // Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 1984. – 47 с.

*Стаття поступила в редакційну колегію*  
23.05.09

*Рекомендована до друку професором*  
**Семенцовим Г.Н.**